

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Problematika výpočtu výměníku pro chlazení kompresoru
The Issue of the Calculation of the Heat Exchanger for Cooling
of the Compressor

Student:

Jan Molík

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Tomáš Výtisk, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Molík**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: **Problematika výpočtu výměníku pro chlazení kompresoru**
The Issue of the Calculation of the Heat Exchanger for Cooling of the Compressor
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Rešerše v oblasti tepelných výměníků.
- 2) Problematika využití a odvodu tepla z chlazení kompresoru.
- 3) Popis měřicí techniky pro diagnostické měření potřebného výkonu výměníku.
- 4) Praktický příklad návrhu výměníku na základě výsledků diagnostického měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOLARČÍK, K. a kol.: Kompresory. Skripta VŠB, Ostrava 2004, 122 s. ISBN 80-248-0704-1.
- [2] BALÁŠ, M.: Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 119 s. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [3] RAJNIAK, I.: Tepelno-energetické a emisné merania. I. vydání, Bratislava: Ister Science, spol. s r.o., 1997, 481 s. ISBN 80-88683-20-3.
- [4] Technická zpráva z diagnostického měření kompresoru. Katedra energetiky, VŠB-TU Ostrava.
- [5] Normy, firemní podklady, internetové zdroje apod.

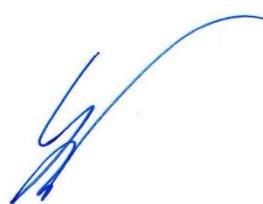
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Výtisk, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 13.5.2016



.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladu, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 13. 5. 2016


.....
podpis

Plné jméno autora práce:

Jan Molík

Adresa trvalého pobytu autora práce: Olomouc, Husova 887/9, 779 00

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Tomáši Výtiskovi, Ph.D. za čas, ochotu a cenné rady při vypracování mé bakalářské práce.

Anotace

MOLÍK, J. Problematika výpočtu výměníku pro chlazení kompresoru. Ostrava, 2016. 48s. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tomáš Výtisk, Ph.D.

Úkolem bakalářské práce je navrhnout vhodný výměník na využití odpadního tepla z pístového kompresoru o konkrétních parametrech. V textové části jsou shrnuty základní informace o funkci pístových kompresorů a vzniku tepla při jeho činnosti. Dále jsou v teoretické části popsány výměníky tepla, využití odpadního tepla a měřicí techniky pro stanovení základních parametrů kompresoru. V praktické části je popsán postup měření na zadaném pístovém kompresoru a návrh s výpočtem potřebných rozměrů výměníku.

Klíčová slova: Pístový kompresor, výměník tepla, využití odpadního tepla, výpočet rozměrů výměníku.

Annotation of the Thesis

MOLÍK, J. The Issue of the Calculation of the Heat Exchanger for Cooling of the Compressor. Ostrava, 2016. 48s. Bachelor Thesis. VŠB-TU Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, The Department of Power Engineering. Thesis head: Ing. Tomáš Výtisk, Ph.D.

The task of the thesis is to devise an appropriate heat exchanger using residual heat from the reciprocating compressor with specific parameters. The basic information about the function of reciprocating compressors and heat generated from its operations are summarized in the text section. Furthermore heat exchangers, residual heat recovery and measurement techniques to determine the basic parameters of the compressor are described in the theoretical section. The practical part describes the procedure for measurement at a given reciprocating compressor and design exchanger with the calculation of the required size of the heat exchanger.

Key words: Reciprocating compressors, heat exchangers, heat recovery, calculate the dimensions of the heat exchanger.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	10
1. Úvod	13
2. Kompresory	14
2.1 Pístové kompresory	14
2.1.1 Popis činnosti pracovního oběhu.....	14
2.1.2 Hlavní části pístového kompresoru	15
2.1.3 Teplo vzniklé při práci pístového kompresoru	16
3. Výměníky tepla	16
3.1 Použití výměníků tepla	16
3.2 Rozdělení tepelných výměníků	17
3.2.1 Podle způsobu přenosu tepla	17
3.2.2 Podle směru a smyslu proudění medií.....	17
3.2.3 Podle způsobu předávání tepla	19
3.2.4 Podle konstrukčního řešení vyhřívané plochy.....	19
3.2.5 Podle kombinace médií	20
3.2.6 Podle účelu a použití	20
3.3 Požadavky na výměníky tepla a teponosná média.	20
3.3.1 Požadavky na výměník.....	20
3.3.2 Požadavky na teponosná média.....	21
3.4 Provoz výměníků tepla	22
3.4.1 Zanášení.....	22
3.4.2 Koroze	22

3.4.3 Abraze.....	23
3.4.4 Další možné poruchy:.....	24
3.5 Chlazení pístových kompresorů	24
4. Problematika využití odpadního tepla.....	25
5. Měření teploty	26
5.1 Teploměry	26
5.1.1 Odporové teploměry	27
5.1.2 Odporové teplotní čidlo Pt100.....	27
5.1.3 Termoelektrické teploměry	28
5.1.4 Termočlánek typu K	28
6. Měření tlaku.....	29
6.1 Tlakoměry	31
6.1.1 Rozdělení podle měřeného tlaku a použití	31
6.1.2 Rozdělení podle funkčního principu	31
6.1.3. Mikromanometr	31
6.2 Prandtlova trubice	32
7. Popis diagnostického měření	34
7.1 Měření teplot	34
7.1.1 Měřicí místa teplot.....	34
7.1.2 Záznam měřených teplot	35
7.2 Atmosferický tlak	35
7.3 Měření průtoku chladícího vzduchu	35
7.4 Výsledky měření.....	38

8. Návrh výměníku	38
8.1 Návrh chladícího média.....	38
8.2 Návrh rozměrů výměníku	38
9. Závěr	44
Seznam obrázků	45
Seznam tabulek	46
Seznam příloh	46
Seznam literatury a dalších zdrojů	47

Seznam použitých značek a symbolů

Zkratka	Celý název	Jednotka
∂_{pod}	Koeficient poměrné podélné rozteče trubek	[-]
$\partial_{\text{př}}$	Koeficient poměrné příčné rozteče trubek	[-]
Δp	Rozdíl tlaků	[Pa]
Δt^I	Rozdíl výstupních teplot	[°C]
Δt^{II}	Rozdíl vstupních teplot	[°C]
$\Delta t_{\text{stř}}$	Logaritmický teplotní spád výměníku	[°C]
A	Konstanta	[°C ⁻¹]
B	Konstanta	[°C ⁻²]
C	Konstanta	[°C ⁻⁴]
c_{pvod}	Měrná tepelná kapacita vody	[J/kg·K]
c_{pvz}	Měrná tepelná kapacita vzduchu	[J/kg·K]
C_t	Konstanta pro střídavé uspořádání trubek	[-]
D	Vnější průměr potrubí	[mm]
d	Vnitřní průměr potrubí	[mm]
F	Síla	[N]
g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]
h	výška	[m]
k_I	Součinitel prostupu tepla ze vzduchu do vody	[W/m·K]
l	Potřebná délka trubky	[m]
L_t	Výchylka kapalinového sloupce v trubici	[m]
n_t	Exponent pro střídavé uspořádání trubek	[-]
p	Tlak	[Pa]
p_{atm}	Atmosférický tlak	[Pa]
p_c	Celkový tlak	[Pa]
p_d	Dynamický tlak	[Pa]
p_N	Tlak pro normální podmínky	[Pa]

Pr_{vod}	Prandtlovo číslo vypočítané pro vodu	[-]
Pr_{vz}	Prandtlovo číslo vypočítané pro vzduch	[-]
p_s	Statický tlak	[Pa]
p_v	Tlak odsávaného chladícího vzduchu	[Pa]
Q_{ch}	Velikost odváděného tepla	[kW]
Q_N	Objemový průtok (při normálních podmínkách)	[m ³ /s]
Q_v	Objemový průtok při skutečné teplotě	[m ³ /s]
R_0	Odpor při 0°C	[Ω]
R_ξ	Odpor čidla	[Ω]
Re_{vod}	Reynoldsovo číslo vypočítané pro vodu	[-]
Re_{vz}	Reynoldsovo číslo vypočítané pro vzduch	[-]
S	Plocha	[m ²]
S_1	Rozteč trubek v příčném směru	[mm]
S_2	Rozteč trubek v podélném směru	[mm]
S_i	Plocha jednotlivých ploch okolo měřené rychlosti	[m ²]
t	Teplota	[°C]
T_1	Teplota vody na vstupu	[°C]
T_2	Teplota vody na výstupu	[°C]
T_3	Teplota vzduchu na sání (okolí)	[°C]
T_4	Teplota vzduchu na výstupu	[°C]
T_N	Teplota pro normální podmínky	[K]
T_v	Teplota odsávaného chladícího vzduchu	[K]
w_i	Rychlost proudění vzduchu v jednotlivých měřících bodech	[m/s]
w_v	Rychlost vzduchu	[m/s]
w_{vod}	Rychlost proudění vody	[m/s]
α_1	Součinitel přestupu tepla ze vzduchu na vnější stěnu trubky	[W/m ² ·K]

α_2	Součinitel přestupu tepla z vody na vnitřní stěnu trubky	[W/m ² ·K]
α_t	Úhel sklopení trubice	[°]
ε_i	Součinitel pro více než 10 řad trubek	[-]
ε_L	Opravný součinitel pro krátké trubky	[-]
ε_R	Opravný součinitel pro oblouky	[-]
ε_S	Součinitel zohlednění uspořádání trubek	[-]
ε_t	Opravný součinitel na neizotermické proudění	[-]
λ_S	Součinitel tepelné vodivosti silikonové stěny hadičky	[W/m·K]
λ_{vod}	Součinitel tepelné vodivosti vody	[W/m·K]
λ_{vz}	Součinitel tepelné vodivosti vzduchu	[W/m·K]
ν_{vod}	Kinetická viskozita vody	[m ² /s]
ν_{vz}	Kinetická viskozita vzduchu	[m ² /s]
ρ_k	Hustota kapaliny	[kg/m ³]
ρ_{vod}	Hustota vody	[kg/m ³]
ρ_{vz}	Hustota vzduchu	[kg/m ³]
ω_k	Rychlost proudící kapaliny	[m/s]

1. Úvod

Kompresory patří mezi nejvyužívanější energetické zařízení ve světě. S jeho použitím se můžeme setkat v dnešní době skoro v každé domácnosti nebo podniku. Některé zdroje uvádí, že na pohon kompresorů se ve světovém měřítku vynakládá až 30% celkové spotřeby energie. Proto vznikají neustále vyšší nároky nejen na konstrukci, technologii a funkci samotného kompresoru, ale také na velmi důležité využití odpadního tepla a správné chlazení kompresoru.

Při kompresi dochází k polytropickému ději, kde část vzniklé energie odchází do okolí ve formě tepla. A právě vzniklé teplo v kompresoru je zapotřebí chladit pomocí chladících technik a výměníků tepla z důvodů bezpečnosti provozu, výkonnosti a životnosti kompresoru. Správná volba typu výměníku, chladícího média a volby parametrů výměníku mohou ovlivnit dokonalost chlazení kompresoru a docílit vyššího využití energie ve formě odpadního tepla.

Problematika využití odpadního tepla patří mezi velmi aktuální téma v oblasti energetiky. Dnes existuje mnoho koncepcí pro využití nízko potencionálního tepla vzniklé při kompresi. Mezi nejvíce využívané varianty v případě použití vody ve výměníku jako teponosného média patří ohřev teplé užitkové vody. S touto variantou bude bakalářská práce počítat při návrhu výměníku.

Jedním z cílů této práce je popsání vhodných měřících technik pro stanovení parametrů kompresoru a zjištění zejména množství dále využitelného tepla vzniklého při kompresi. Dále se práce bude zabývat návrhem konkrétních variant typů výměníků, které budou schopny odpadní teplo odváděné chlazením kompresoru efektivně využívat. Naměřené a zvolené hodnoty budou zpracovány pomocí rovnic z oblasti sdílení tepla a následně výsledky porovnány v kompletním návrhu rozměrů výměníků.

2. Kompresory

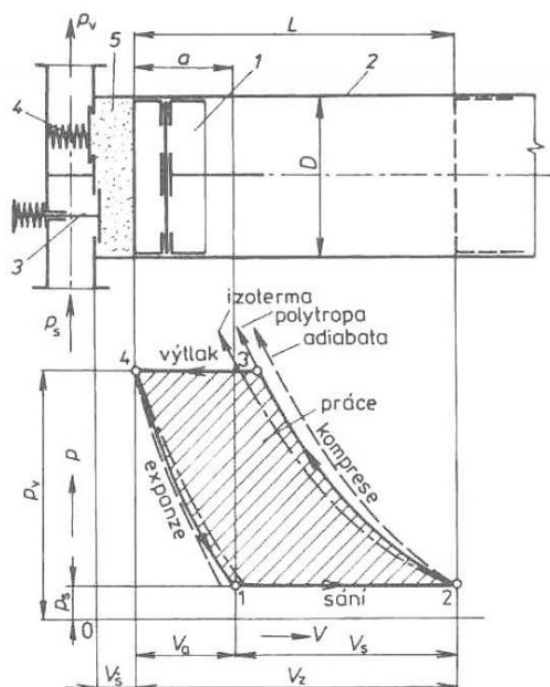
Kompresor je technické zařízení využívané k dopravě a stlačování plynů a par. Do kompresoru dodáváme hnací energii nejčastěji mechanickou (elektrickou) a získáváme zvýšení energie tlakové nasávané pracovní látky. Je označován jako stroj pracovní (potřebuje ke své činnosti vnější energii) a tepelný stroj (při přeměně energie se většina mechanické energie mění v teplo). Proto je zapotřebí kompresory chladit. Tento sekundární energetický stroj patří mezi nejpoužívanější stroje ve světě. [1; 2]

2.1 Pístové kompresory

Patří mezi objemové kompresory s vratným pohybem pracovního elementu. Nejčastěji využívané v chemickém průmyslu díky jejich schopnosti dosahovat vysokých tlaků. Pístové kompresory zvyšují tlakovou energii zmenšováním pracovního prostoru ve válci, kde je nasátý plyn uzavřen. Změnu objemu prostoru ve válci dosahujeme zmiňovaným vratným pohybem pístu (pracovním elementem) poháněným nejčastěji klikovým mechanismem. Pracovní oběh pístového kompresoru se skládá ze čtyř základních činností sání, komprese, výtlaku a expanze, které jsou graficky znázorněny v pracovním oběhu pístového kompresoru viz Obr. 2.1. [1; 2; 3]

2.1.1 Popis činnosti pracovního oběhu

1. **Sání-** vlivem přetlaku atmosférického vzduchu dochází k samočinnému otevření sacího ventilu a nasátí pracovní látky do pracovního prostoru. Sací tlak p_s je během sání konstantní. Píst se pohybuje do přední úvrati.
2. **Komprese-** vlivem změny pohybu pístu z přední úvrati do zadní úvrati dochází k uzavření sacího ventilu a následně stlačování nasáté pracovní látky. Stlačování probíhá polytropicky (při stlačování dochází ke zvyšování teploty v pracovním prostoru).
3. **Výtlak-** při dosažení výtlakového tlaku p_v dojde k otevření výtlakového ventilu. Vytlačované pracovní médium se pak dále dodává při konstantním tlaku. V takzvaném škodlivém prostoru V_s v pracovním prostoru (mezi hlavou válce a pístem) zůstává část pracovního média.
4. **Expanze-** zbylé pracovní médium expanduje z objemu V_s a dochází k poklesu tlaku na hodnotu p_s (tlak sací). Sací ventil se otevírá a pracovní oběh se opakuje. [3]



1. Píst
2. Válec
3. Sací ventil
4. Výtlačný ventil
5. Škodlivý prostor

1. Sání
2. Komprese
3. Výtlač
4. Expanze

Obr. 2.1 Pracovní oběh pístového kompresoru [3]

2.1.2 Hlavní části pístového kompresoru

U návrhu a konstrukce kompresorů musíme počítat s periodickou změnou objemu pracovního prostoru. Mezi hlavní části pístových kompresorů patří:

Pracovní prostor- je ohraničený hlavou válce, vnitřním povrchem válce, pístem a ventily.

Rozvody kompresorů-zde patří ventily ovládané tlakem pracovního média (plynu) a silou pružiny na ventilu. Nejpoužívanější ventily jsou ventily kroužkové a destičkové, které můžeme vidět na obr. 2.2 a 2.3. Ventily jsou umístěny ve ventilových komorách nejčastěji v hlavě válce nebo po jeho obvodu.



Obr. 2.2 Kroužkové ventily [4]



Obr. 2.3 Destičkové ventily [6]

Klikový mechanismus- slouží jako pohon pracovního elementu (pístu) a mění pohyb rotační na pohyb přímočarý vratný. Skládá se z klikové hřídele, ojnice, křížáku, křížákového čepu, pístnice (ucpávky), pístu a pístových kroužků. Kliková hřídel je vložena v klikové skříni na jednom nebo více ložiskách. [4; 5]

2.1.3 Teplo vzniklé při práci pístového kompresoru

Při kompresi pracovního média dochází ke zvýšení teploty ve válci. Při stlačování (kompresi) nastává polytropický děj, kde je část vzniklého tepla odváděná do okolí (stěny válce). Zahříváním pracovního média a pracovního prostoru dochází ke zhoršení mazání, k nebezpečí vznícení mazacího oleje a k možnému narušení samotné činnosti kompresoru. Proto je důležité pracovní prostor pístového kompresoru chladit. [3; 5]

3. Výměníky tepla

Výměníky tepla jsou technologická zařízení sloužící k průběžné nebo přerušované výměně tepelné energie mezi dvěma teplotně odlišnými médii. Mezi médii o rozdílných parametrech dochází k přestupu tepla z teplejšího média do média chladnějšího. Výměníky se mohou využívat jak pro ohřev daného média, tak i pro jeho chlazení. Tyto zařízení mají široké využití nejen ve strojírenství a najdeme je v mnoha rozdílných konstrukcích a provedeních. [7; 8]

3.1 Použití výměníků tepla

Využití u výměníků tepla je opravdu široké a záleží na jeho konstrukčním a technologickém provedení. V energetice se můžeme nejčastěji setkat s těmito druhy aplikace:

- Ohřev pracovní látky – Zvyšování teploty pracovní látky (média). Nejčastěji dochází k ohřevu vody nebo vzduchu. Ohřevné medium bývá nejčastěji pára, horká voda nebo spaliny.
- Chlazení pracovní látky – Snižování teploty chlazeného média.
- Výroba páry – Dochází ke změně skupenství vody z kapaliny na páru.
- Kondenzace páry – Dochází ke zkapalnění páry, kde odevzdané teplo je většinou teplo ztrátové.
- Využití odpadního tepla – využití zbytkového tepla vzniklého například při výrobě elektřiny. Nejčastěji využíváné na vytápění. [7; 8]

3.2 Rozdělení tepelných výměníků

V praxi se můžeme setkat se širokou škálou typů a kombinací výměníku, proto je důležité je dělit podle několika kritérií.

3.2.1 Podle způsobu přenosu tepla

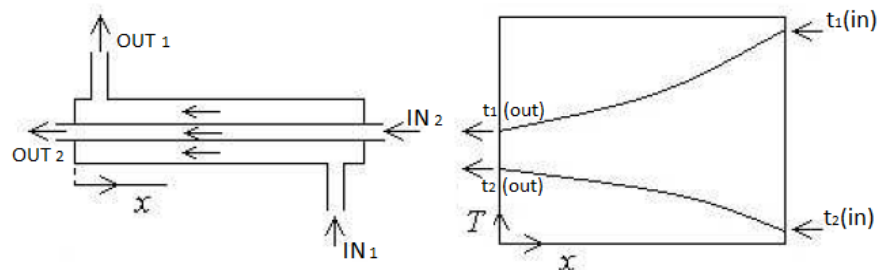
Výměníky můžeme rozdělit podle způsobu, kterým dochází k přenosu tepla mezi medii.

- **Konvekční** – k přestupu tepla dochází převážně konvekcí (prouděním) a o předaném teple rozhodují hlavně parametry proudících medii.
- **Sálavé (radiační)** – většina tepla se přenáší sáláním.
- **Kombinované** – kombinace přenosu tepla prouděním i sáláním. [7; 8]

3.2.2 Podle směru a smyslu proudění medii

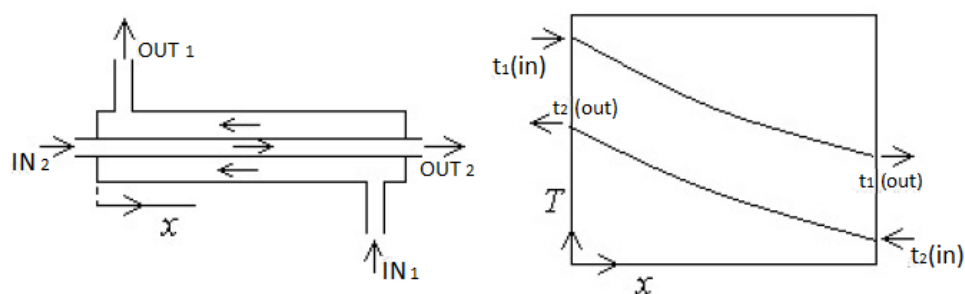
Různé typy proudění medii ovlivňují průběh přestupu tepla ve výměnících. Jednotlivé druhy proudění teplosměnných medií můžeme vidět na obrázku č. 3.3.

- **Souproudé** – směry vektoru rychlostí a os proudů medii jsou rovnoběžné a jejich proudění je paralelní. (viz. Obr. 3.1)



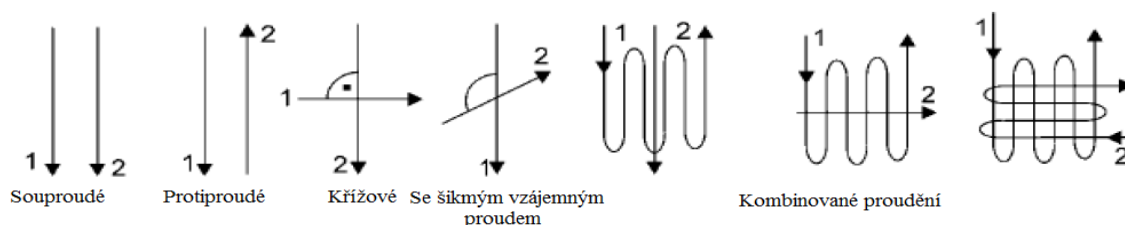
Obr. 3.1 Schéma souproudého výměníku a průběh teplot [8]

- **Protiproudé** – osy proudů medií jsou rovnoběžné, ale vektory rychlostí mají opačný směr. (viz Obr. 3.2)



Obr. 3.2 Schéma protiproudého výměníku a průběh teplot [8]

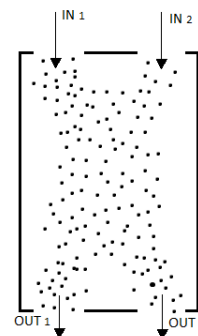
- **Křížové** – v kolmém průmětu mezi sebou osy proudů svírají úhel 90° .
- **Se šikmým vzájemným proudem** – v kolmém průmětu mezi sebou osy proudů svírají úhel větší nebo menší než 90° .
- **Vícenásobně souproudé, protiproudé a křížové proudění.**
- **S kombinovaným prouděním.** [7; 8]



Obr. 3.3 Druhy proudění teplosměnných médií [9]

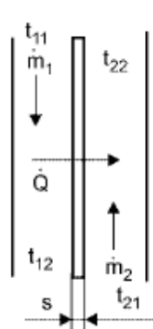
3.2.3 Podle způsobu předávání tepla

- **Rekuperační výměníky** – obě pracovní média (ohřívající i ohřívané) jsou ve výměníku oddělena stěnou. Nedochozí ke kontaktu médií a teplo je přenášeno prostupem tepla (vedení + proudění). Schéma viz Obr 3.5.
- **Regenerační výměník** – ohřívané médium proudí s určitou časovou odchylkou za médium ohřívající do vymezeného prostoru. Ve vymezeném prostoru je pevný teplo přenášející element, který předává dříve naakumulované teplo přivedené ohřívajícím médiem. Tento proces se neustále opakuje. Může dojít ke smísení médií. Princip znázorněn viz Obr 3.5.
- **Kontaktní výměník** – obě média vstupují do jednoho prostoru, kde se promíchávají a předávají si tepelnou energii. Následně jsou od sebe opět rozděleny. Teplosměnná plocha je určena povrchem částic pevné fáze. Viz Obr 3.4.

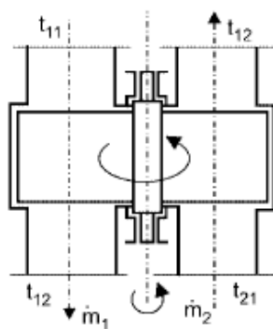


Obr. 3.4 Schéma kontaktního výměníku

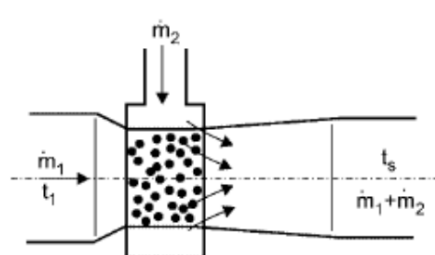
- **Směšovací výměník** – v tomto výměníku nejsou teplosměnné plochy. Média se smíchávají a vytváří homogenní směs. Viz obr. 3.5. [7; 8; 9]



Rekuperační



Regenerační



Směšovací

Obr. 3.5 Schéma typů výměníků podle způsobu přenosu tepla [9]

3.2.4 Podle konstrukčního řešení vyhřívané plochy

Mezi nejčastěji používané výměníky patří- bubnové, deskové, trubkové, svazkové, šroubové, hadové, žebrové, vlásenkové apod.

3.2.5 Podle kombinace médií

- Voda – voda
- Voda – pára
- Pára – vzduch
- Pára – olej
- Spaliny – voda
- Spaliny – pára
- Spaliny – vzduch

3.2.6 Podle účelu a použití

- Ohříváky – nedochází ke změně skupenství ohřívaného média, pouze zvyšuje svojí teplotu.
- Chladiče – nedochází ke změně skupenství média, pouze chladicí médium snižuje teplotu chlazeného média.
- Výparníky a odparky – dochází ke změně skupenství, kde ohřívané kapalně médium mění skupenství na plynné (páru).
- Kondenzátory – nastává změna skupenství teplejšího média ve formě páry, které se mění ochlazením v kapalnou fázi (kondenzát)
- Sušárny – pomocí přivedeného tepla se dosahuje ke snížení vlhkosti látky v pevné fázi.
- Termické odplynováky vody, topná tělesa ústředního vytápění, atd.
- Přehříváky a mezipřehříváky (přihříváky) – používají se ke zvýšení teploty přehřáté nebo syté páry. [7; 8; 10]

3.3 Požadavky na výměníky tepla a teponosná média.

Při navrhování výměníku tepla se snažíme dosáhnout co nejintenzivnější výměny tepla s co nejmenšími ztrátami do okolí s ohledem na vhodnou ekonomickou náročnost. Intenzitu tohoto procesu můžeme ovlivnit volbou vhodného materiálu výměníku, volbou správného pracovního média a konstrukčním provedením.

3.3.1 Požadavky na výměník

Na výměníky je kladeno několik základních požadavků, které jsou často protichůdné. Proto při návrhu vždy musíme volit kompromis mezi jednotlivými prvky.

- 1) Co nejmenší rozměr, hmotnost a pořizovací cena.
- 2) Co nejmenší tlakové ztráty (čerpací práce).
- 3) Co nejvyšší spolehlivost a bezpečnost v provozu.
- 4) Snadná údržba a dobrá opravitelnost.
- 5) Vysoká účinnost.

3.3.2 Požadavky na teplotonosná média.

Volba teplosměnné látky ve výměníku je ovlivněna především pracovní teplotou, tlakem, velikostí a materiálem výměníku.

Mezi základní požadavky patří:

- 1) Vhodný vztah mezi teplotou varu a tlakem.
- 2) Vysoký součinitel tepelné vodivosti a přestupu tepla.
- 3) Velká měrná tepelná kapacita.
- 4) Nízké tlakové ztráty při proudění související s nízkou viskozitou média.
- 5) Přiměřená cena pracovní látky.
- 6) Nízká agresivita média.
- 7) Zdravotní nezávadnost a bezpečnost při provozu.

Nejčastěji volenou teplosměnnou látkou je voda nebo vodní pára z důvodu optimálního splnění výše uvedených požadavků. Na druhou stranu největší nedostatek je možnost vzniku koroze materiálu a usazování soli obsažené ve vodě. U vody je navíc potřeba udržovat dostatečný tlak, aby nedocházelo ke změně skupenství při vyšších pracovních teplotách.

Plyny mají při přenosu tepla nevýhodu kvůli nízké měrné tepelné kapacitě, špatnému součiniteli přestupu tepla a tepelné vodivosti. Proto je zapotřebí větších objemových průtoků a větší výhřevné plochy výměníku.

Při volbě teplotonosného média je zapotřebí najít východisko mezi pořizovacími náklady, provozními náklady a předepsanou jednotkou energie. [7; 8]

3.4 Provoz výměníků tepla

Při činnosti výměníků tepla se můžeme setkat s určitými poruchami, s kterými je nutné se vyrovnat.

Nejčastější poruchy:

3.4.1 Zanášení

Zanášení je usazování materiálu v pracovní ploše výměníku. Mezi tento materiál nejčastěji patří sůl, pevné látky a korozní produkty. Nepříznivé materiály mají negativní účinky na funkci výměníku. Mohou tvořit zvýšený tepelný odpor a tím snižují přenos tepla. Dále zužují průtočný průřez a zvyšují rychlost proudícího pracovního média (abraze), zvýší se tlakové ztráty. Usazeniny mohou také vytvářet korozní prostředí. Při velkém až úplném zanesení může dojít i k porušení trubek, prasknutí svarů nebo vytržení trubek z trubkovnice. Nánosy mají velmi nízkou tepelnou vodivost, dochází tedy ke zhoršení přenosu tepla a poklesu výkonu výměníků. [7; 10]

Zanesení lze předcházet:

Konstrukční opatření.

Snížením koncentrace solí v pracovních látkách.

Snížením koncentrace popílků ve spalínách.

Mechanické čištění výměníku.

Chemické čištění výměníku.

3.4.2 Koroze

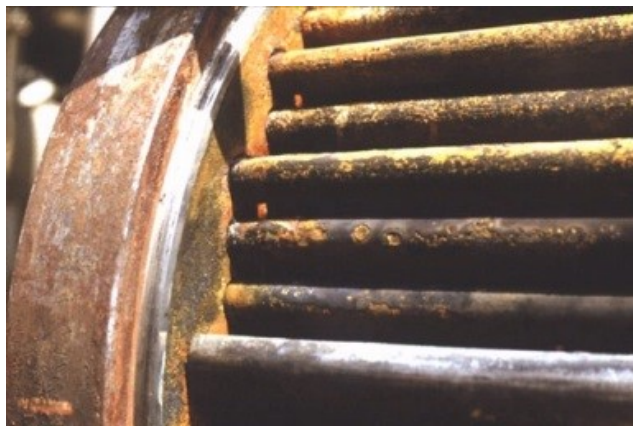
Koroze je u výměníků tepla nejčastěji ovlivněna kvalitou materiálu výhřevných ploch a teplosměnnými médii. Koroze může způsobovat zanesení a zeslabování trubek. Nejčastější příčina koroze v případě vody je chemické složení vody a chybné odplynění vody. U spalovacích výměníků v případě, že spaliny obsahují SO_2 vznikají kyseliny. Při dosažení rosného bodu kyseliny způsobují nízkoteplotní koroze. Rozsáhlou korozi trubek u výměníku můžete vidět na obrázku 3.6. [7;10]

Prevence proti korozi:

Chemická úprava složení vody (média).

Optimalizace spalovacího procesu.

Volba odolného materiálu výměníků.



Obr. 3.6 Koroze trubek ve výměníku [11]

3.4.3 Abraze

Abraze (otěr) vzniká z důvodů obsahu tuhých částic v teplotněm médiu. Tyto částice způsobují otěr a dochází k úbytku materiálu. Abraze se vyskytuje nejčastěji u ohříváků vody a u ohříváků vzduchu kotle.

Opatření proti abrazi:

Předcházení zanášení a korozi.

Snížení rychlosti média.

Pasivní ochrana trubek viz obr. 3.7, konstrukční úpravy.



Obr. 3.7 Pasivní ochrana trubek proti abrazi [10]

3.4.4 Další možné poruchy:

Špatné svary.

Netěsnosti v zaválcování.

Trhliny v důsledku vibrační svazků trubek.

Kavitační poškození. Kvalita těsnění.

Eroze z kondenzace. [7; 9; 10]

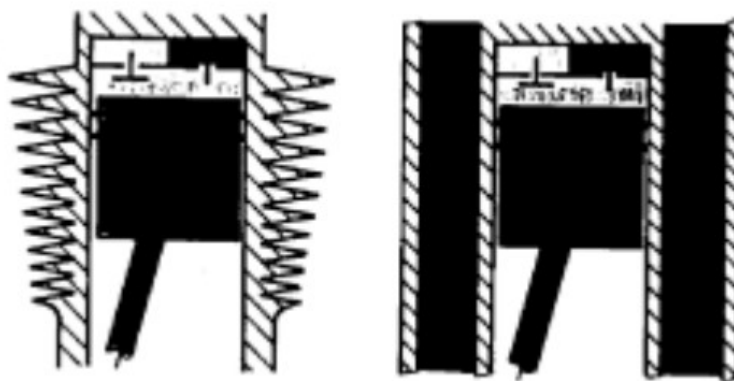
3.5 Chlazení pístových kompresorů

Při chlazení kompresoru je důležité vědět množství tepla vzniklého při kompresi, abychom mohli zvolit nejvhodnější způsob chlazení. K čím větší kompresi dochází, tím více vzniká tepla a je zapotřebí pracovní prostor efektivněji chladit.

U malých kompresorů s malým kompresním poměrem se nejčastěji používá pouze chlazení vzduchem pomocí chladičích žebër umístěných na vnějším povrchu válce viz Obr. 3.8.

U středních a větších kompresorů můžeme využívat vzduchové chlazení s vynuceným prouděním vzduchu zajištěné axiálním ventilátorem. Nevýhodou této varianty je vyšší spotřeba energie kompresoru, způsobená poháněním ventilátoru, než u kompresorů chlazených vodou.

Nejúčinnější chlazení je chlazení vodou, které se používá u velkých kompresorů. Můžeme zvolit chlazení bez nuceného nebo s nuceným oběhem chladičí vody. Nejčastěji se voda zavádí do meziprostoru opláštěvaného válce viz obr. 3.8. Plášť a válec jsou běžně odlity z jednoho kusu. [3; 12]



Obr. 3.8 Vzduchové a vodní chlazení kompresorů [12]

4. Problematika využití odpadního tepla.

Využití odpadního tepla jako druhotného zdroje energie je v dnešní době velice aktuální problematika. Právě kompresory patří mezi velký zdroj nízko potenciálního tepla. Teplo odváděné při chlazení dosahuje až 80% přivedené energie pro pohon stroje.

Dnes existuje široká škála koncepcí využití odpadního tepla. Mezi jedny z nejvyužívanějších v případě chlazení vzduchem patří teplovzdušné vytápění nebo temperování vnitřních prostorů v zimním období. O velikosti topného výkonu rozhoduje především výstupní teplota plynu ve stroji a příkon kompresoru.

Při chlazení kompresoru vodou můžeme využít odvedené teplo na ohřev teplé užitkové vody nebo vytápění pomocí nízkotepelných vodních soustav. Při správné úpravě chladicí vody lze dosáhnout teplot až 90°C.

[2]

Využití odpadního tepla je velmi závislé na časovém vytížení kompresoru, typu a velikosti kompresoru a také na ročním období. Proto je tato tematika velice individuální, ale přesto energeticky i ekonomicky vyžadovaná. Je dobré udělat finanční analýzu, zda je výhodné teplo využívat nebo ne. Všeobecně se udává, že využití tepla se vyplatí u kompresorů s příkonem větším než 15kW.

Dále se v této práci budeme zabývat konkrétními metodami měření a typy měřidel pro stanovení teplot, tlaků a průtočného množství, které se používají při diagnostických měřeních na pístových kompresorech. Pomocí měření jsme zjistili základní parametry kompresoru, které byly použity při návrhu a výpočtu výměníku.

5. Měření teploty

Teplota je stavová veličina, která charakterizuje termodynamický stav kterékoliv makroskopické soustavy.

Míra intenzity teploty se určuje srovnáním teplotní stupnice. Teplotní stupnice je stupnice číselných, posloupných hodnot teploty určující různý stav určité soustavy, látky nebo tělesa. [13; 14; 15]

5.1 Teploměry

Přístroje sloužící pro měření teploty. Pracují na principu závislosti fyzikálních veličin na teplotě (např. tepelná roztažnost).

Všeobecně můžeme teploměry rozdělit do tří kategorií:

Dotykové- tyto teploměry mají čidlo umístěné v měřeném prostředí.

Dotykové dále dělíme: Dilatační, odporové a termoelektrické teploměry.

Bezdotykové- měří teplotu těles bez umístění (dotyku) čidla v měřeném prostředí. Měří pomocí využití vlastností tepelného záření. Příslušné zařízení pro tyto měření se nazývá pyrometr.

Speciální- mezi speciální měření teplot patří například kovové teploměrné tělíska nebo Segerove žároměrky. [13]

5.1.1 Odporové teploměry

Teploměry při měření teploty využívají změny velikosti elektrického odporu u kovů a polovodičů v závislosti na změně jejich teploty. [13]

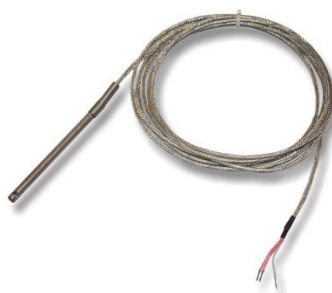
5.1.2 Odporové teplotní čidlo Pt100

Jedeno z nejvíce používaných teplotních čidel u odporových teploměrů právě díky jejich velkému rozsahu měření, přesnosti, lineárnímu vztahu mezi teplotou a odporem, trvanlivosti a snadnému připojení. Teplotní čidlo Pt100 viz obr. 5.1. [17]

Zkratka Pt: označuje materiál s kterého je čidlo vyrobeno: Platina

Číslo 100: označuje elektrický odpor $100\ \Omega$ při 0°C

Vlastnosti: mechanicky méně odolné, velký rozsah měřených teplot, vysoká přesnost.



Obr. 5.1 Odporové teplotní čidlo Pt100 [16]

Hodnota odporu čidla v souladu s normou ČSN EN 60751 je vyjádřena rovnicí:

V rozsahu teplot -200 až 0°C :

$$R_t = R_0 \cdot (1 + At + Bt^2 + C \cdot (t - 100) \cdot t^3) [\Omega] \quad (5.1)$$

Kde: $R_t[\Omega]$ - je odpor čidla, $R_0 = 100[\Omega]$ - je hodnota elektrického odporu čidla při 0°C , $t[^\circ\text{C}]$ - je naměřená teplota, $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} [^\circ\text{C}^{-1}]$ - konstanta, $B = -5,775 \cdot 10^{-7} [^\circ\text{C}^{-2}]$ - konstanta, $C = -4,183 \cdot 10^{-12} [^\circ\text{C}^{-4}]$ - konstanta.

V rozsahu teplot 0 až 850°C:

$$R_x = R_0 \cdot (1 + At + Bt^2) [\Omega] \quad (5.2)$$

Kde: $R[\Omega]$ - je odpor čidla, $R_0 = 100[\Omega]$ - je hodnota elektrického odporu čidla při 0°C, $t[^\circ\text{C}]$ - je naměřená teplota, $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} [^\circ\text{C}^{-1}]$ - konstanta, $B = -5,775 \cdot 10^{-7} [^\circ\text{C}^{-2}]$ - konstanta, $C = -4,183 \cdot 10^{-12} [^\circ\text{C}^{-4}]$ - konstanta.

5.1.3 Termoelektrické teploměry

Patří k dotykovým termoelektrickým teploměrům. Při měření teploměr využívá Seebeckova termoelektrického jevu.

Seebeck termoelektrický jev: „spojíme-li dva dráty z různých materiálů, tak můžeme na jejich volných koncích měřit napětí, a to za předpokladu, že se teplota na spojovacím místě liší od teploty na volných koncích drátů.“

Čidlem těchto teploměrů je termoelektrický článek, který se skládá ze dvou různých na obou koncích spojených materiálů (nejčastěji kovů). Tyto články se rozlišují podle druhu materiálů, z kterých jsou tvořeny. [13; 14]

5.1.4 Termočlánek typu K

Složení: (NiCr – NiAl) niklchrom – niklhlíník.

Vlastnosti dle ČSN EN 60584-1

Teplotní rozsah použití: -50°C až 1000°C.

Krátkodobé teplotní zatížení: až 1300°C

Termoelektrické napětí: cca 4,8 (mV/100°C)

Odolnost v oxidačním prostředí: velká

Odolnost v redukčním prostředí: malá, při vyšších teplotách potřeba ochrany

[18]

Tabulka 5.1 Třídy přesnosti pro termočlánky dle ČSN EN 60584-2

Type	Rozsah Třída 1	Rozsah Třída 2	Rozsah Třída 3
K	-40 až 1000°C ±1,5°C	-40 až 1200°C ±2,5°C	-200 až 40°C ±2,5°C

Vlastnosti termočlánků ovlivňuje také průměr drátů, u kabelových termočlánekových snímačů průměr drátů a podmínky v měřeném prostředí. [18]

6. Měření tlaku

Měřený tlak je určen jako poměr elementu síly dF , který působí na element plochy dS ve směru normály. Tlak značíme symbolem p . Jednotkou tlaku je pascal (Pa). Jeden pascal představuje sílu jednoho newtonu rozloženou na rovinné ploše o velikosti jednoho čtverečního metru.

Základní rovnice pro tlak:

$$p = \frac{dF}{dS} [\text{Pa}] \quad (6.1)$$

Kde: $p[\text{Pa}]$ - tlak, $F[\text{N}]$ - síla působící na rovinnou plochu, $S[\text{m}^2]$ - je rovinná plocha.

[13]

Tlak lze rozdělit:

Absolutní nulový tlak- tlak v prostoru, kde není hmota.

Absolutní tlak- tlak měřený od absolutně nulového tlaku.

Barometrický tlak- tlak ovzduší na zemi měřený u zemského povrchu, měří se od absolutní nuly a má charakter tlaku absolutního.

Přetlak- rozdíl tlaku barometrického a tlaku absolutního, kde tlak absolutní je vyšší než barometrický.

Podtlak- rozdíl tlaku barometrického a tlaku absolutního, kde tlak absolutní je nižší než barometrický.

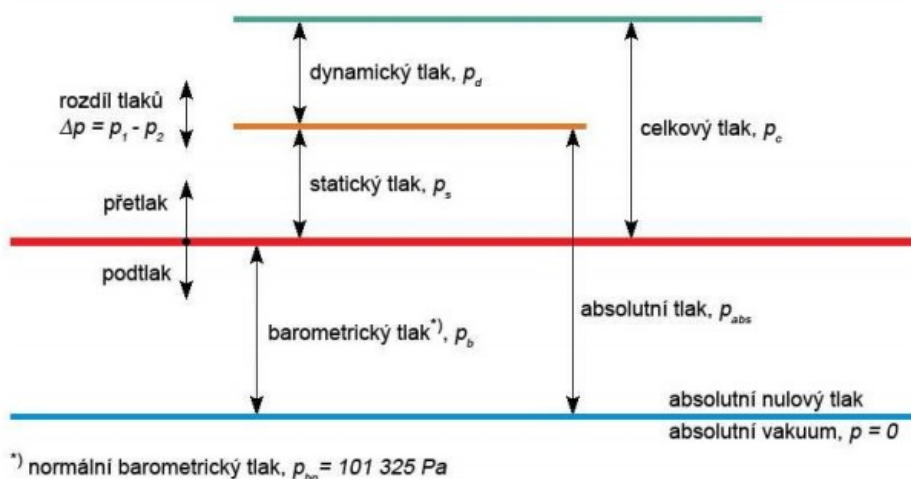
Vakuum- velký podtlak (malý absolutní tlak, nižší než tlak barometrický)

Rozdíl tlaků- rozdíl dvou tlaků p_1 a p_2 , kde se oba tlaky liší od tlaku barometrického.

$$\Delta p = p_1 - p_2 [\text{Pa}] \quad (6.2)$$

Kde: $\Delta p[\text{Pa}]$ - je rozdíl tlaků, $p_1[\text{Pa}]$ - první tlak, $p_2[\text{Pa}]$ - druhý tlak.

Rozdělení tlaků můžeme vidět schematicky znázorněné na obrázku č. 6.1. [14]



Obr. 6.1 Základní rozdělení tlaků

[19]

Nárůst tlaku pod hladinou kapaliny v určité hloubce h:

$$p = h \cdot \rho_k \cdot g [\text{Pa}] \quad (6.2)$$

Kde: $p[\text{Pa}]$ - tlak, $h[\text{m}]$ - výška (hloubka), $\rho_k [\text{kg/m}^3]$ -hustota kapaliny, $g[\text{m/s}^2]$ - tíhové zrychlení.

V kapalině rozlišujeme dva tlaky. V kapalině, která je v klidu působí tlak statický p_s . Při pohybu kapalin (v proudící kapalině) působí jak tlak statický p_s , tak také tlak dynamický p_d . V proudící kapalině působí v určitém bodě v obecném směru tlak celkový p_c . Celkový tlak je součtem tlaku dynamického a statického. [13]

Rovnice pro celkový tlak v proudící kapalině:

$$p_c = p_s + p_d = p_s + \frac{\omega_k^2}{2} \cdot \rho_k \quad (6.3)$$

Kde: $p_c[\text{Pa}]$ - celkový tlak, $p_s[\text{Pa}]$ - statický tlak, $p_d[\text{Pa}]$ - dynamický tlak, $\omega_k[\text{m/s}]$ - rychlost proudící kapaliny, $\rho_k [\text{kg/m}^3]$ -hustota kapaliny.[13]

6.1 Tlakoměry

Tlak se měří přístroji, které se nazývají tlakoměry.

6.1.1 Rozdělení podle měřeného tlaku a použití

Manometry- slouží pro měření přetlaků

Barometry- využívají se k měření tlaků v ovzduší.

Vakuometry- pro měření velkých podtlaku (k měření vakua)

Manovakuometry- používají se k měření podtlaku i přetlaku.

Diferenční tlakoměry- pro měření tlakových rozdílů. [14]

6.1.2 Rozdělení podle funkčního principu

Kapalinové tlakoměry- měřený tlak se vyrovnává hydrostatickým tlakem tlakoměrné kapaliny. Hodnotu tlaku udává výška sloupce a hustota tlakoměrné kapaliny. Tlakoměrná kapalina se volí podle rozsahu měření, a také záleží na vlastnostech měřeného prostředí.

Deformační tlakoměry- tlak je měřen způsobenou pružnou deformací měrného prvku. Hodnota deformace je úměrná velikosti měřeného tlaku. Mezi základní představitele této skupiny patří tlakoměry membránové.

Pístové a zvonové tlakoměry- měřený tlak působí na píst nebo zvon vyvážený závažím či pružinou. Velikost tlaku určujeme ze zdvihu zvonu nebo pístu o známém průřezu a hmotnosti.

Elektrické tlakoměry- změna elektrické veličiny závislé na tlaku udává měřený tlak.

6.1.3. Mikromanometr

Zařízení pro měření malých tlaků. Jedná se o kapalinový nádobový manometr. Jeho trubici můžeme sklápět o úhel α (0° až 90°) a tím ovlivňovat jeho citlivost. Sklápěním trubice a zmenšováním úhlu α se s postupným snižováním rozsahu zvyšuje citlivost

(přesnost). Délka trubice se nejčastěji pohybuje od 200mm do 600mm. Jako náplň do trubice se nejvíce využívá líh. Schéma mikromanometru můžeme viz Obr. 6.2. [13; 14]

Výhody:

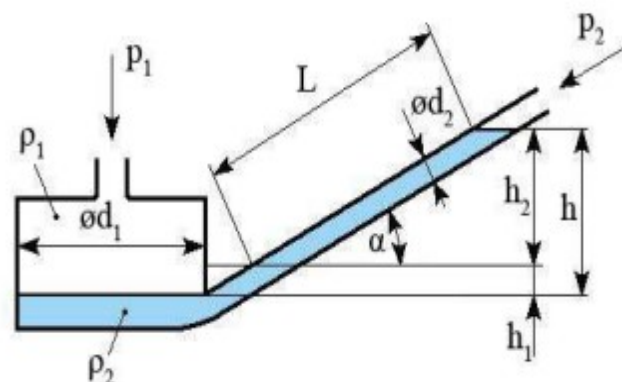
Vysoká přesnost měření 0,01mm.

Změna citlivosti a rozsahu manometru.

Nevýhody:

Malý rozsah měřených tlaků.

Nutná kalibrace průřezu nádobek a trubic. (Musí být konstantní.)



Obr. 6.2 Schéma mikromanometru [20]

V některých případech při malých úhlech je měření nepohodlné a nepraktické.

Tlakový rozdíl je dán vztahem:

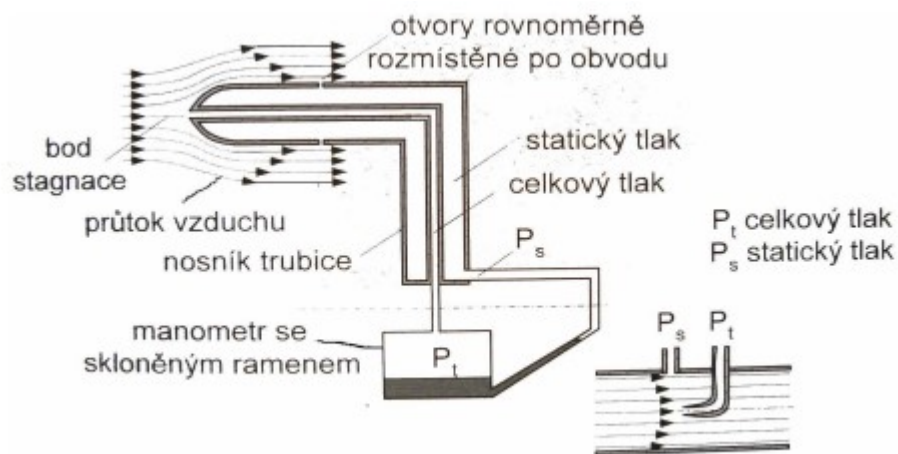
(6.4)

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot (h_1 + h_2) = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot L_t \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} + \sin \alpha_t \right) = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot L \cdot e [Pa]$$

Kde: $\Delta p [Pa]$ - tlakový rozdíl, $S_1 [m^2]$ je průřez nádobky, $S_2 [m^2]$ je průřez trubice, $L_t [m]$ je výchylka kapalinového sloupce v trubici, $\alpha_t [^\circ]$ - úhel sklopení trubice [20]

6.2 Prandtlůva trubice

Zařízení pro měření dynamického p_d a statického p_s tlaku. Jedná se o zvláštní Pitotovu trubici upravenou tak, aby se celkový statický tlak měřil ve stejném místě proudící tekutiny. Určení rychlosti proudění při jeho známém směru. Jde o tenkou trubičku otočenou ústím proti směru proudící tekutiny. Používá se v kombinaci s mikromanometrem viz. obr. 6.3. [13]



Obr. 6.3 Schéma Prandtlovi trubice tvaru L [21]

Celkový tlak při měření Prandtlovou trubicí lze vypočítat pomocí Bernoulliho rovnice.

Rovnice pro celkový tlak P_c :

$$p_c = p_s + p_d = p_s + \frac{\omega^2}{2} \cdot \rho_k \text{ a } \omega_k = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_d)}{\rho_k}} = \sqrt{\frac{2 p_d}{\rho_k}} \quad (6.5)$$

Kde: p_c [Pa]- celkový tlak, p_s [Pa]- tlak statický, p_d [Pa]- tlak dynamický, ω_k [m/s]- rychlost proudící kapaliny, ρ_k [kg/m³]-hustota kapaliny.[13]

7. Popis diagnostického měření

Na konkrétním řešení kompresoru (viz obrázek 7.1) bylo provedené praktické měření pro stanovení potřebných hodnot k výpočtu a návrhu výměníku.



Obr. 7.1 Řešený kompresor

7.1 Měření teplot

Měření teplot vzduchu v okolí kompresoru (uvnitř zakrytování kompresoru) a ve výstupním potrubí (odvádějící chladicí vzduch ze zakrytování kompresoru) bylo provedeno plášťovanými termočláňkovými teploměry, typ „K“ .(plášťovaný termočlánek NiCr-Ni, Ø 3 mm). Termočláňky byly propojeny pomocí kompenzačního vedení s mobilním měřícím systémem.

7.1.1 Měřící místa teplot

V 8 zvolených měřících bodech uvnitř zakrytování kompresoru a jeho pohonu (cca 150 mm od povrchu pláště zakrytování) byly umístěny měřící konce termočláňků.

Ve 4 měřících bodech ve výstupní trubce (\varnothing 375mm) chladicího vzduchu byly teploměry umístěny v průřezu nad odsávacím ventilátorem, cca 20 mm nad jeho ochrannou mříží. Měřící konce teploměrů byly umístěny cca 70 mm od vnitřního povrchu trubky.

7.1.2 Záznam měřených teplot

Záznam měřených dat při měření byl proveden mobilním měřicím systémem Solarton-Schlumberger (měřicí ústřednou), což je počítačem řízený systém vhodný pro teplo-technická měření v elektrárnách. Měřicí systém Solartron-Schlumberger, který byl použit pro výše popsaná měření je sestaven z počítačové I/O karty „3595 4A“ a externích sběrných karet „IMP 35951“. Komunikace mezi interface kartou (3595 4A) umístěné v PC počítači a externími sběrnými kartami (IMP 35951) je pomocí S-Net kabelu, jehož délka může být až 1500m. Pro komunikaci a zpracování naměřených hodnot je použit obslužný software pracující v prostředí Windows.

Externí sběrné karty (IMP 35951) jsou 16-ti bit. analogově-digitální převodníky, umožňující přesná měření teploty pomocí termočlánků nebo odporových teploměrů, statických a diferenčních tlaků pomocí tlakoměrů s proudovým nebo napěťovým výstupem, nebo jiných fyzikálních veličin, jejichž převodníky mají proudový nebo napěťový výstup. Tyto karty umožňují při měření teplot pomocí termočlánků kompenzaci studeného konce termočlánku pomocí zabudovaných termistorů nebo přesného zadání okolní teploty.

Tyto proměnné byly snímány, ukládány a zpracovány v intervalu 10s.

[22]

7.2 Atmosferický tlak

Atmosferický tlak byl měřen digitálním snímačem absolutního tlaku fy Airflow.

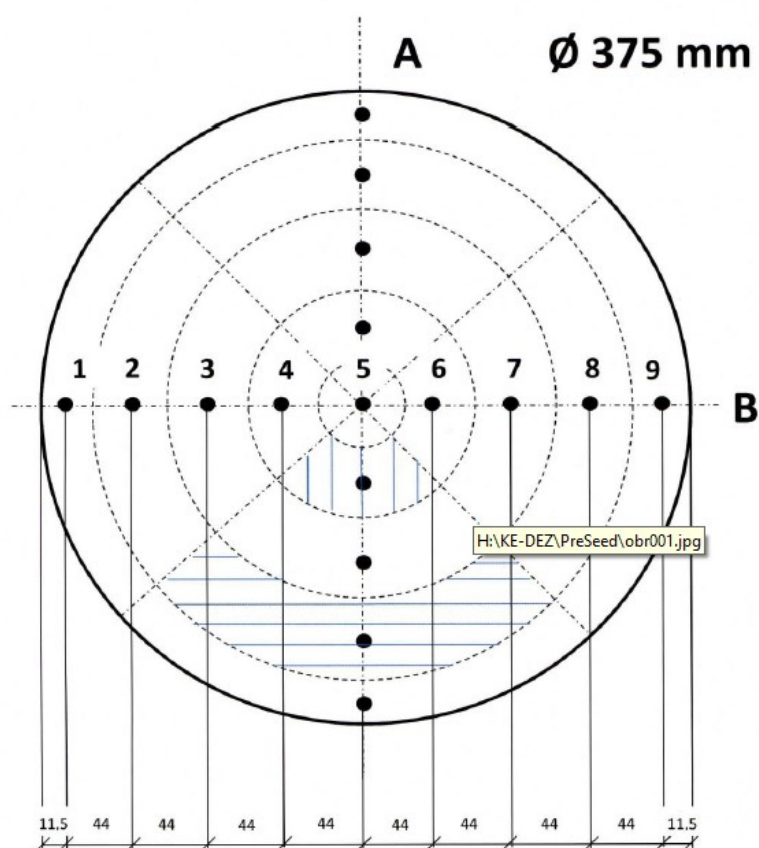
7.3 Měření průtoku chladicího vzduchu

Průtok chladicího vzduchu byl měřen na konci trubky, kterou byl odváděn chladicí vzduch (průměr \varnothing 375 mm, délka 1 500 mm. Trubka byla nasazena na výstupní otvor odvádějící chladicí vzduch z prostoru zakrytování kompresoru viz obrázek 7.2. Chladicí vzduch je odsáván z prostoru zakrytování odsávacím ventilátorem, který je umístěn ve výstupním otvoru.

Měření rychlostí odsávaného vzduchu bylo provedeno vrtulkovým anemometrem s přímým odečítáním měřených rychlostí. Měření bylo provedeno ve 4 měřících přímkách, na každé měřicí přímce bylo 9 měřících bodů. Rozmístění měřících bodů je uvedeno na Obr.7.3.



Obr. 7.2 Odvod chladícího vzduchu z krytu kompresoru



Obr. 7.3 Rozdělení měřících bodů pro stanovení rychlosti proudění [22]

Průřez výstupního potrubí chladícího vzduchu byl rozdělen na dílčí plochy, v jejichž středu byly jednotlivé měřicí body pro měření rychlosti protékajícího vzduchu. Objemový průtok chladícího vzduchu byl vypočten jako suma jednotlivých dílčích průtoků, které protékají jednotlivými plochami v okolí měřících bodů rychlosti proudění.

Výpočet objemového průtoku při skutečné teplotě:

$$Q_v = \sum_i w_i \cdot S_i [m^3 / s] \quad (7.1)$$

Kde: Q_v [m^3/s]- objemový průtok (při skutečné teplotě), w_i [m/s]- rychlost proudění vzduchu v jednotlivých měřících bodech, S_i [m^2]- plocha jednotlivých ploch okolo měřené rychlosti.[22]

Objemový průtok odsávaného chladícího vzduchu při skutečné teplotě byl pomocí stavové rovnice ideálního plynu přepočten na objemový průtok při normálních podmínkách ($t_n = 0^\circ C$, $p_n = 101\,325\,Pa$).

Výpočet objemového průtoku při normálních podmínkách:

$$Q_N = Q_v \cdot \frac{p_v}{T_v} \cdot \frac{T_N}{p_N} [m^3_N / s]$$

Kde: Q_N [m_N^3/s]- objemový průtok (při normálních podmínkách), Q_v [m^3/s]- objemový průtok (při skutečné teplotě), T_v [K]- teplota odsávaného chladícího vzduchu, p_v [Pa]- tlak odsávaného chladícího vzduchu (atm. tlak), T_N [K]- teplota pro normální podmínky (273,15K), p_N [Pa]- tlak pro normální podmínky (101 325Pa)

Teplota odsávaného chladícího vzduchu byla stanovena jako průměr ze 4 měřených teplot ve výstupním potrubí chladícího vzduchu.[22]

7.4 Výsledky měření

Výsledky měření jsou zaznamenány do tabulky 7.1. Velikost odváděného tepla Q_{ch} je stanovena jako maximální výkon výměníku.

Tabulka 7.1 Výsledky diagnostického měření

Název	Hodnota	Jednotka
Atmosferický tlak: p_{atm}	98 800	[Pa]
Teplota okolí (sání): T_3	23	[°C]
Teplota vzduchu na výstupu: T_4	40	[°C]
Objemový průtok vzduchu: Q_N	0,22	[m ³ _N /s]
Velikost odváděného tepla: Q_{ch}	4,95	[kW]

8. Návrh výměníku

Při návrhu výměníku byl zvolen rekuperační výměník. Dále ve výpočtu byla zvolena konstrukce protiproudého trubkového výměníku, které patří v této problematice mezi běžně používané výměníky. Ve výpočtech jsem se zabýval především volbou vhodného materiálu výměníku, tak aby splňoval požadavky.

8.1 Návrh chladícího média

Na základě stanoveného maximálního výkonu bylo zvoleno jako chladící medium voda a tedy kombinace výměníku vzduch-voda, z důvodu lepšího součinitele tepelné vodivosti λ . Čímž jsme docílili efektivnějšího chlazení a menších rozměrů výměníku.

8.2 Návrh rozměrů výměníku

V následující části jsme zjišťovali potřebné rozměry výměníku za pomoci rovnic z oblasti sdílení tepla.

Protiproudý trubkový výměník

1) Logaritmický teplotní spád ve výměníku: $\Delta t_{stř}[^{\circ}\text{C}]$

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t^I - \Delta t^{II}}{\ln \frac{\Delta t^I}{\Delta t^{II}}} [^{\circ}\text{C}] \quad \rightarrow \quad \Delta t_{stř} = \frac{(T_4 - T_2) - (T_3 - T_1)}{\ln \frac{(T_4 - T_2)}{(T_3 - T_1)}} [^{\circ}\text{C}] \quad (8.1)$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{(40 - 30) - (23 - 10)}{\ln \frac{(40 - 30)}{(23 - 10)}} = 11,43 [^{\circ}\text{C}]$$

Kde: $\Delta t_{stř}[^{\circ}\text{C}]$ - je logaritmický teplotní spád, $\Delta t^I[^{\circ}\text{C}]$ - rozdíl výstupních teplot, $\Delta t^{II}[^{\circ}\text{C}]$ - rozdíl vstupních teplot.

Předpokládané teploty:

$T_1 = 10^{\circ}\text{C}$ teplota vody na vstupu (předpokládáno)

$T_2 = 30^{\circ}\text{C}$ teplota vody na výstupu (požadováno)

$T_3 = 23^{\circ}\text{C}$ teplota vzduchu na vstupu (měřeno)

$T_4 = 40^{\circ}\text{C}$ teplota vzduchu na výstupu (měřeno)

2) Volba rozměrů trubky- hadičky (D, t)

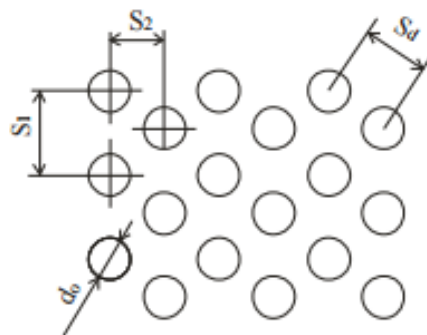
Předpokládáme silikonovou hadičku 10/1 MVQ60 D= 12[mm], d= 10[mm],

$\lambda_s = 130[\text{W/m.K}]$.

Kde: D[mm]- je vnější průměr potrubí, d[mm]- vnitřní průměr potrubí, $\lambda_s[\text{W/m.K}]$ - součinitel tepelné vodivosti silikonové stěny.

3) Volba systému uspořádání trubek

Volím vystřídané uspořádání trubek. Trubky o vnějším průměru d_0 jsou od sebe vzdáleny s roztečí S_1 ve vertikálním směru a S_2 v horizontálním směru viz obr. 8.1.



Obr. 8.1 Schéma vystřídáního uspořádání trubek [23]

Volba vzdálenosti roztečí trubek: S_1, S_2 [mm]

$$S_1 = 4 \cdot D = 48 [\text{mm}] \quad (8.2)$$

$$S_2 = 3 \cdot D = 36 [\text{mm}] \quad (8.3)$$

Kde: S_1 [mm]- je rozteč trubek v příčném směru, S_2 [mm]- je rozteč trubek v podélném směru a D [mm] je vnější průměr trubek.

Výpočet koeficientů poměrné příčné a podélné rozteče trubek: $\delta_{př, pod}$ [-]

$$\delta_{př} = \frac{S_1}{D} [-] \quad \delta_{pod} = \frac{S_2}{D} [-] \quad (8.4)$$

$$\delta_{př} = \frac{48}{12} = 4 [-] \quad \delta_{pod} = \frac{36}{12} = 3 [-]$$

Kde: $\delta_{př}$ [-]- je koeficient poměrné příčné rozteče trubek, δ_{pod} [-]- je koeficient poměrné podélné rozteče trubek, S_1 [mm]- je rozteč trubek v příčném směru, S_2 [mm]- je rozteč trubek v podélném směru a D [mm] je vnější průměr trubek.

4) Výpočet Reynoldsova čísla pro vzduch: Re_{vz} [-]

Vyjadřuje poměr molekulárního tření a setrvačných sil.

$$Re_{vz} = \frac{w_{vz} \cdot D}{\nu_{vz}} = \frac{2,5 \cdot 0,012}{1,726 \cdot 10^{-5}} = 173812 [-] \quad (8.5)$$

Kde: $w_{vz}=2,5[\text{m/s}]$ - rychlost vzduchu (naměřená průměrná hodnota), $D=12[\text{mm}]$ - vnější průměr trubek (zvolené), $\nu_{vz}=1,726 \cdot 10^{-5}[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ - kinematická viskozita vzduchu při teplotě 40°C .

5) Výpočet Prandtlova čísla pro vzduch: $\text{Pr}_{vz}[-]$

Vyjadřuje fyzikální podobnost tekutin při sdílení tepla.

$$\text{Pr}_{vz} = \frac{\nu_v \cdot \rho_v \cdot c_{pvz}}{\lambda_{vz}} = \frac{1,726 \cdot 10^{-5} \cdot 1,127 \cdot 1013}{0,0272} = 0,724[-] \quad (8.6)$$

Kde: $\nu_{vz}=1,726 \cdot 10^{-5}[\text{m}^2/\text{s}]$ - kinematická viskozita vzduchu při teplotě 40°C , $\rho_{vz}=1,127[\text{kg}/\text{m}^3]$ - hustota vzduchu při teplotě 40°C , $c_{pvz}=1013[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ - měrná tepelná kapacita vzduchu a $\lambda_{vz}=0,0272 \cdot [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ -součinitel tepelné vodivosti vzduchu.

6) Součinitel přestupu tepla ze vzduchu na vnější stěnu trubky: $\alpha_1[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$

$$\alpha_1 = C_t \cdot \frac{\lambda_{vz}}{D} \cdot \text{Re}_{vz}^{n_t} \cdot \text{Pr}_{vz}^{0,33} \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_i [\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}] \quad (8.7)$$

$$\alpha_1 = 0,41 \cdot \frac{0,0272}{0,012} \cdot 1738,12^{0,6} \cdot 0,724^{0,33} \cdot 1,05 \cdot 1 [\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}]$$

$$\alpha_1 = 77,13 [\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}]$$

Kde: $C_t=0,41[-]$ - je konstanta pro střídavé uspořádání trubek, $\lambda_{vz}=0,0272 \cdot [\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$ - součinitel tepelné vodivosti vzduchu při teplotě 40°C , $D=12[\text{mm}]$ - vnější průměr trubek (zvolené), $\text{Re}_{vz}=1738,12[-]$ -Reynoldsovo číslo vypočítané pro vzduch (8.5), $n_t=0,6[-]$ - exponent pro střídavé uspořádání trubek, $\text{Pr}_{vz}=0,724[-]$ -Prandtlovo číslo vypočítané pro vzduch (8.6), $\varepsilon_s=1,05[-]$ - součinitel zohlednění uspořádání trubek, $\varepsilon_i=1[-]$ - součinitel pro více než 10 řad trubek.

7) Výpočet Reynoldsova čísla pro vodu: $\text{Re}_{vod}[-]$

$$\text{Re}_{vod} = \frac{w_{vod} \cdot d}{\nu_{vod}} = \frac{1,06 \cdot 0,01}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 10557,769[-] \quad (8.8)$$

Kde: $w_{vod}=1,06[\text{m/s}]$ - rychlost proudění vody (předpokládaná hodnota), $d=10[\text{mm}]$ - vnitřní průměr trubek (zvolené), $\nu_{vod}=1,004 \cdot 10^{-6}[\text{m}^2/\text{s}]$ - kinematická viskozita vody pro střední hodnotu teploty 20°C .

8) Výpočet Prandtlůva čísla pro vodu: $Pr_{\text{vod}}[-]$

$$Pr_{\text{vod}} = \frac{\nu_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O} \cdot c_{pH_2O}}{\lambda_{H_2O}} = \frac{1,004 \cdot 10^{-6} \cdot 998,2 \cdot 4180}{0,6} = 6,982[-] \quad (8.9)$$

Kde: $\nu_{\text{vod}}=1,004 \cdot 10^{-6}[\text{m}^2/\text{s}]$ - kinematická viskozita vody pro střední hodnotu teploty 20°C , $\rho_{\text{vod}}=998,2[\text{kg}/\text{m}^3]$ - hustota vody při teplotě 20°C , $c_{p\text{vod}}=4180[\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}]$ - měrná tepelná kapacita vody a $\lambda_{\text{vod}}=0,6[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$ -součinitel tepelné vodivosti vody při teplotě 20°C .

9) Součinitel přestupu tepla z vody na vnitřní stěnu trubky: $\alpha_2[\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$

-Turbulentní proudění trubkami:

$$\alpha_2 = 0,021 \cdot \frac{\lambda_{\text{vod}}}{d} \cdot Re_{\text{vod}}^{0,8} \cdot Pr_{\text{vod}}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_R \cdot \varepsilon_L [W / m^2 \cdot K] \quad (8.10)$$

$$\alpha_2 = 0,021 \cdot \frac{0,6}{0,01} \cdot 10557,769^{0,8} \cdot 6,982^{0,43} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 [W / m^2 \cdot K]$$

$$\alpha_2 = 4809,94 [W / m^2 \cdot K]$$

Kde: $\lambda_{\text{vod}}=0,6[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$ -součinitel tepelné vodivosti vody při teplotě 20°C , $d=10[\text{mm}]$ - vnitřní průměr trubek (zvolené), $Re_{\text{vod}}=10557,769[-]$ -Reynoldsovo číslo vypočítané pro vodu (8.8), $Pr_{\text{vod}}=6,982[-]$ -Prandtlůvo číslo vypočítané pro vodu (8.9), $\varepsilon_t=1[-]$ - opravný součinitel na neizotermické proudění, $\varepsilon_R=1[-]$ - opravný součinitel pro oblouky, $\varepsilon_L=1[-]$ - opravný součinitel pro krátké trubky.

10) Velikost součinitele prostupu tepla ze vzduchu do vody: $k_l[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$

$$k_l = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot D} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_s} \cdot \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d}} [W / m \cdot K] \quad (8.11)$$

$$k_l = \frac{\pi}{\frac{1}{77,11 \cdot 0,012} + \frac{1}{2 \cdot 130} \cdot \ln \frac{0,012}{0,01} + \frac{1}{4809,94 \cdot 0,01}} = 2,85 [W / m \cdot K]$$

Kde: $k_l[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$ - je součinitel prostupu ze vzduchu do vody, $\alpha_1[\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$ - součinitel přestupu tepla ze vzduchu na vnější stěnu trubky (8.7), $D=12[\text{mm}]$ - vnější průměr trubek (zvolené), $\lambda_s=130[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$ - součinitel tepelné vodivosti silikonové stěny, $d=10[\text{mm}]$ -

vnitřní průměr trubek (zvolené), $\alpha_2[\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$ Součinitel přestupu tepla z vody na vnitřní stěnu trubky (8.10).

11) Potřebná délka trubky: $l[\text{m}]$

$$l = \frac{Q_{ch}}{k_l \cdot \Delta t_{stř}} [\text{m}] \quad (8.12)$$

$$l = \frac{4950}{2,85 \cdot 11,43} = 151,95 [\text{m}] \quad \text{Volím } 152\text{m}$$

Kde: $Q_{ch}[\text{kW}]$ - velikost odváděného tepla, $k_l[\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}]$ - je součinitel prostupu ze vzduchu do vody (8.11), $\Delta t_{stř}$ - logaritmický teplotní spád ve výměníku.



Obr. 8.2 Příklad provedení tepelného výměníku se silikonovým potrubím

Pomocí přílohy Výpočet výměníku v programu Microsoft Excel jsem provedl stejný výpočet pro měděné potrubí: Výpočty byly provedeny dle rovnic (8.1) až (8.12).

HETCU Trubka CU 15x1 polotvrdá 11P01510. $D= 15[\text{mm}]$, $d=13[\text{mm}]$, $\lambda_s=320[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$

Tabulka 8.1 Tabulka výsledků pro měděné potrubí:

Název	Součinitel přestupu tepla α_1	Součinitel přestupu tepla α_2	Součinitel prostupu tepla: k_l	Potřebná délka potrubí: l
Hodnota	70,54	3001,77	3,23	134
Jednotka	$[\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$	$[\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$	$[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$	$[\text{m}]$

9. Závěr

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout tepelný výměník pro využití odpadního tepla z pístového kompresoru. Pro návrh tepelného výměníku bylo zapotřebí provést diagnostické měření na zadaném pístovém kompresoru a následné zjištění vstupních a výstupních parametrů.

V úvodu práce byla provedena rešerše v oblasti pístových kompresorů, popsání funkce a především vznik tepla při práci pístového kompresoru. Dále práce popisuje použití, rozdělení a funkci výměníků tepla a využití odpadního tepla.

Pro úplné objasnění problematiky návrhu výměníku pro využití odpadního tepla byly nastíněny měřicí techniky, které se používají při diagnostickém měření na pístovém kompresoru. A to především měření teplot, tlaků a průtočného množství v kompresoru.

Po provedení diagnostického měření a zjištění parametrů pro výpočet výměníku následoval konkrétní návrh protiproudého trubkového výměníku. Jako teplotonosné medium byla zvolena voda. Tepelný výměník ohřívá vodu na zvolených 30°C, která se bude využívat jako teplá užitková voda. Při výpočtu, práce vychází z rovnic v oblasti sdílení tepla a jsou vypočteny dva druhy potrubí. Silikonová hadička 10/1 MVQ60 s požadovanou délkou 152m a HETCU Trubka CU 15x1 polotvrdá 11P01510 s požadovanou délkou 134m.

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Pracovní oběh pístového kompresoru	15
Obr. 2.2 Kroužkové ventily	15
Obr. 2.3 Destičkové ventily	16
Obr. 3.1 Schéma souproudého výměníku a průběh teplot.....	18
Obr. 3.2 Schéma protiproudého výměníku a průběh teplot.....	18
Obr. 3.3 Druhy proudění teplosměnných médií	18
Obr. 3.4 Schéma kontaktního výměníku	19
Obr. 3.5 Schéma typů výměníků podle způsobu přenosu tepla	19
Obr. 3.6 Koroze trubek ve výměníku	23
Obr. 3.7 Pasivní ochrana trubek proti abrazi	23
Obr. 3.8 Vzduchové a vodní chlazení kompresorů	25
Obr. 5.1 Odporové teplotní čidlo Pt100	27
Obr. 6.1 Základní rozdělení tlaků	30
Obr. 6.2 Schéma mikromanometru	32
Obr. 6.3 Schéma Prandtlovi trubice tvaru L	33
Obr. 7.1 Řešený kompresor	34
Obr. 7.2 Odvod chladícího vzduchu z krytu kompresoru	36
Obr. 7.3 Rozdělení měřicích bodů pro stanovení rychlosti proudění.....	36
Obr. 8.1 Schéma vystřídání uspořádání trubek.....	40
Obr. 8.2 Příklad provedení tepelného výměníku se silikonovým potrubím.....	43

Seznam tabulek

Tabulka 5.1 Třídy přesnosti pro termočlánky dle ČSN EN 60584-2	29
Tabulka 7.1 Výsledky diagnostického měření	38
Tabulka 8.1 Tabulka výsledků pro měděné potrubí:	43

Seznam příloh

Příloha č.1 Výpočet výměníku	
------------------------------	--

Seznam literatury a dalších zdrojů

- [1] LIŠKA, Antonín a Pavel NOVÁK. *Kompresory*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01145-3.
- [2] KAMINSKÝ, Jaroslav, Kamil KOLARČÍK a Oto PUMPRLA. *Kompresory*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. 122s. ISBN 80-248-0704-1.
- [3] OTIPKA, J, *Kompresory*, [Online]. [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-str-09.01_kompresory_turbokompresory.pdf
- [4] VÝTISK, Tomáš, *Provoz energetických strojů- Kompresory*. [PDF]. Ostrava : VŠB- Technická univerzita, Katedra energetiky. 2015.
- [5] COMPRESSORS-TECHNOLOGY, *Pístové kompresory*, [Online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://compressors-technology.webnode.cz/pistove-kompresory>
- [6] PLŠEK, Petr, *Pístové stroje*, [Online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_08-07.pdf
- [7] BALÁŠ, Marek, *Kotle a výměníky tepla*, 2. vydání. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2013. 119s. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [8] ROSYPAL, Štěpán, *Výměníky tepla*, Brno, 2010. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. MAREK BALÁŠ.
- [9] KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV, *Výměníky tepla*, [Online]. [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125yatm/prednasky/125yatm-06.pdf>
- [10] DLOUHÝ, Tomáš, *Výměníky tepla v energetice*, [Online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: [http://energetika.cvut.cz/files/VTK%20pr1\[1\].pdf](http://energetika.cvut.cz/files/VTK%20pr1[1].pdf)
- [11] VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE, *Štěrbínová koroze*, [Online]. [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/koroze/d_sterb.htm
- [12] KATEDRA ODĚVNICTVÍ, *Kompresory*, [Online]. [cit. 2016-03-17]. Dostupné z: http://www.kod.tul.cz/predmety/AOV/dalsi_mat/kompresory.pdf

- [13] RAJNIAK, I, a kolektiv, *Meranie v tepelnej energetike*, Bratislava : Alfa, 1989. 400s. ISBN 80-05-00089-8.
- [14] JENČÍK, J, KUHN, L, *Technická měření ve strojnictví*, 1.vydání. Praha : SNTL, 1982. ISBN 04-223-82
- [15] KATEDRA FYZIKY OSU, *Teplota a její měření*, [Online]. [cit. 2016-02-08].
Dostupné z:
http://artemis.osu.cz:8080/artemis/uploaded/199_3_3%20Teplota_mereni.pdf
- [16] PIXSYS, *Pt100*, [Online]. [cit. 2016-03-18]. Dostupné z:
<http://www.pixsys.net/en/products/temperature-sensors/pt100-%C3%98-6mm-air-probes-with-cable-easy-up>
- [17] WIKIPEDIA, *Pt100*, [Online]. [cit. 2016-03-18]. Dostupné z:
<https://nl.wikipedia.org/wiki/Pt100>
- [18] GÜNTHER, *Termočláňkové snímače teploty*, [Online]. [cit. 2016-03-18].
Dostupné z: <https://www.guenther.eu/805a74a9-7235-cdf2-2323-717e02f019e4?Edition=cz>
- [19] WÖHLER, *Tlak*, [Online]. [cit. 2016-02-06]. Dostupné z:
<http://www.woehler.cz/cz/hlavni-menu/odborne-informace/obecne/tlak>
- [20] JAKUBEC, Jan. *Měření tlaku*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.
- [21] ŠARATA, Roman. *Obecné principy měření průtoků*. Zlín, 2008. Bakalářská práce. Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. LUBOMÍR MACKŮ, Ph.D.
- [22] Technická zpráva z diagnostického měření kompresoru. Katedra energetiky, VŠB-TU Ostrava.
- [23] HOUSÍREK, Jiří, Výpočtové postupy příčně obtékaného svazku trubek, Brno, 2012. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. BOHUSLAV KILKOVSKÝ, Ph.D.